

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ТРУБ

Жиганов И.Ю., Скворцов Д.Б.

Коллективом сотрудников ОНИЛ-5, совместно со специалистами ООО «Протон» по заказу Ассоциации металлоторговцев России, создан прибор для измерения длины труб, предназначенный для использования в коммерческих операциях приема и отгрузки металлопродукции [1]. Прибор достаточно хорошо работает в складских помещениях при изменении температуры в пределах $\pm 10^\circ\text{C}$. Для изучения возможностей использования прибора в более жестких климатических условиях на открытых площадках проведены исследования дополнительных погрешностей данного прибора.

Принцип действия прибора основан на измерении времени распространения акустического импульса в прямом и обратном (после отражения от конца трубы) направлениях. При этом длина определяется по формуле:

$$L = cT/2 \quad (1)$$

где c - скорость звука в трубе, T - время распространения акустического импульса в прямом и обратном направлениях.

Абсолютная погрешность измерений ΔL определится как сумма частных производных функции (1) по параметрам, выраженная в конечных приращениях:

$$\Delta L = 0,5(\Delta c T + c \Delta T). \quad (2)$$

Дополнительные погрешности возникают при эксплуатации прибора в условиях, отличных от нормальных. Важнейшим фактором, определяющим дополнительную погрешность прибора, является зависимость скорости распространения звука от различных климатических и физических факторов. К таким факторам относятся: температура и влажность среды, давление, плотность, теплопроводность и примеси посторонних газов, ветер в трубах, влияние внешнего акустического шума, грязь и посторонние предметы в трубах, нестабильность параметров источника питания и электронных компонентов схемы. Дополнительная погрешность определится первой половиной формулы (2) и запишется в виде:

$$\Delta L = 0,5\Delta c T_0 = 0,5(c - c_0)T_0, \quad (3)$$

где Δc - суммарное изменение скорости звука в воздухе от различных факторов, T_0, c_0 - время распространения импульса и скорость звука в трубе при нормальных условиях.

$$\text{Относительная погрешность определится: } \varepsilon = \frac{0,5\Delta c}{c_0} \quad (4)$$

При анализе дополнительных погрешностей воспользуемся результатами многочисленных работ, посвященных исследованию влияния разнообразных факторов на скорость распространения звука в газовых средах [2,3].

Влияние температуры. Скорость звука в сухом атмосферном воздухе определяется формулой [3]:

$$c = 20,067\sqrt{\theta}, \quad (5)$$

где θ - абсолютная температура воздуха в градусах Кельвина. Без использования каких либо приемов термокоррекции температурная составляющая погрешности измерений в диапазоне 240 – 320 град К (-37 - +47 град С) составит 4,1 %, или 0,051 %/град, что очень много и требует обязательного применения корректирующих устройств.

При использовании для целей термокоррекции микропроцессорного устройства вполне можно пользоваться алгоритмом (5). Однако, программирование этого алгоритма с высокой точностью требует достаточно большого объема памяти и приводит к усложнению конструкции и повышению стоимости прибора. Поэтому рассмотрим более простые алгоритмы термокомпенсации. Анализ графика показывает, что в указанном диапазоне температур формула (5) хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Среднеквадратическая аппроксимация кривой (5) по методу наименьших квадратов, проведенная с помощью математического пакета Mathcad 7 дает следующее уравнение: $c = 0,601\theta + 167,217$. (6)

Максимальная абсолютная погрешность аппроксимации составляет 0,58 м/сек при $\theta = 240$ град К. Программа приведена в приложении 3.2. На длине трубы в 12 м это приводит к абсолютной погрешности измерений $\Delta L = 0,01$ м, а в относительных значениях 0.087 %, что вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям и может быть реализовано не только простым микропроцессорным устройством, не требующим внешнего ПЗУ, но и простыми схемотехническими, в частности параметрическим, приемами. Отметим, что соотношение (5) справедливо для звуковых волн длина которых превышает длину свободного пробега молекул, то есть до частот, равных 10^8 Гц.

Влияние влажности. Скорость звука зависит от содержания водяных паров. Упрощенно зависимость скорости звука от парциального давления водяных паров выражается эмпирической формулой:

$$c_e = c_\theta (1 + 0,00022e), \quad (7)$$

где c_θ - скорость звука в сухом воздухе при температуре θ ,

e -- парциальное давление водяных паров.

Формула (7) легко программируется и может быть использована как для микропроцессорной, так и для параметрической компенсации показаний. Численно при температуре 273 град К увеличение относительной влажности от 60 до 100 % приводит к повышению скорости звука на 1,5 %.

Влияние газовых примесей. Скорость звука в воздухе зависит от содержания примесей посторонних газов, особенно CO_2 . Согласно [3] при увеличении содержания углекислого газа в воздухе на 0,03 % скорость звука убывает на 0,2 м/сек. Излишнее содержание кислорода уменьшает, а содержание азота повышает скорость звука в воздухе.

Влияние давления. Теоретически скорость звука связана с давлением по формуле [2]:

$$c = \sqrt{\frac{C_p p}{C_v \rho}}. \quad (8)$$

где, p, ρ - равновесные значения давления и плотности среды, C_p, C_v - удельные теплоемкости среды в изобарном (при постоянном давлении) и изохорном (при постоянном объеме) процессах, соответственно. Прямая пропорционально давлению возрастает плотность среды. Поэтому при давлениях близких к атмосферному реальной зависимости скорости звука от давления не наблюдается. При этом следует учесть, что при больших давлениях, до 200 атмосфер, скорость звука увеличивается на 20 % [3]. Отметим также, что при очень низких давлениях, меньших 0,01 атмосферы и больших частотах, больших 200 кГц, имеет место сильная зависимость скорости звука от давления.

Влияние поглощения. Важнейшим фактором, влияющим на скорость звука в среде, является коэффициент поглощения. Фактор поглощения звука в среде приводит нас к необходимости использования понятия групповой скорости при определении длины трубы. Скорость распространения акустического импульса в среде характеризуется двумя параметрами: фазовой скоростью, характеризующей скорость распространения фронта, и групповой скоростью, характеризующей скорость распространения энергии. Так как акустический приемник, как и любой другой, сравнивается по энергетическому уровню, то при определении длины трубы следует принять во внимание групповую скорость распространения импульса $V_{г.р}$, а формулу (1) переписать в виде:

$$L = V_{г.р} \frac{\Delta t}{2}, \quad (9)$$

где $V_{г.р}$ определяется по формуле: $V_{г.р} = \frac{1}{\frac{dh(\omega)}{d\omega}} = \frac{d\omega}{dh(\omega)}, \quad (10)$

где $h(\omega) = k(\omega) = \frac{\omega}{c} [1 - i\alpha(\omega)], \quad (11)$

есть функция затухания для данной среды, α - коэффициент затухания, определяемый по формуле:

$$\alpha = \frac{\omega}{2\rho c^2} \left[\frac{4}{3} \eta + \zeta + \xi \frac{C_p - C_l}{C_p C_l} \right]; \quad (12)$$

η, ζ, ξ - динамическая вязкость, вторая вязкость и коэффициент теплопроводности среды.

Учитывая, что групповая скорость распространения звука определяется через волновое число по формуле (10), можно записать:

$$V_{гп} = \frac{c}{1 - i[\alpha(\omega) + \omega\alpha'(\omega)]}.$$

При этом модуль групповой скорости в зависимости от коэффициента поглощения запишется:

$$V_{гп} = \frac{c_0}{\sqrt{1 + [\alpha(\omega) + \omega\alpha'(\omega)]^2}}, \quad (13)$$

где c_0 – скорость распространения звука в среде при гипотетическом условии отсутствия затухания. Для низких частот (до 10 кГц) и нормальных бытовых давлениях, при которых используются исследуемые приборы,

$\alpha(\omega) = \text{Const} = \alpha$ и формула (3.14) примет вид: $V_{гп} = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \alpha^2}}, \quad (14)$

где $c_0 = 404$ м/сек. – соответствует скорости звука при гипотетическом условии отсутствия затухания в воздухе, значение которого вычислено из предположения того, что коэффициент поглощения воздуха при скорости 331,45 м/сек равен 0,697 /3/. Таким образом, оценивая коэффициент поглощения, можно вычислять реальную скорость распространения звука в среде и корректировать показания прибора в соответствии с алгоритмом (14). Отметим, что коэффициент поглощения является наиболее общим интегральным параметром, который в скрытой форме учитывает все вышеперечисленные факторы. Из формулы (14) видно, что с ростом коэффициента поглощения воздуха скорость звука в нем падает. Погрешность, вызванная изменением коэффициента поглощения воздуха, вычисляется

по формуле: $\varepsilon = \frac{0,5[V_{гп}(\alpha) - 331,45]}{331,45} \quad (15)$

Расчеты показывают, что погрешность от изменения коэффициента поглощения воздуха весьма значительна и может достигать до 10 % в диапазоне изменения коэффициента поглощения от 0 до 1. Так как коэффициент затухания достаточно просто измеряется и является комплексным параметром, отражающим все свойства среды, (температуру, влажность, давление, вязкость и теплопроводность), то корректирование результатов измерения по параметру поглощения следует признать перспективным. Зависимости коэффициента поглощения звука от частоты, влажности и температуры хорошо изучены /2/. Это позволяет связать воедино указан-

ные конкретные физические параметры с коэффициентом поглощения среды и, в конечном счете, с погрешностью измерений.

Влияние ветра в трубах. Важным является также анализ влияния ветра на скорость распространения информационного акустического сигнала. В [3] показано, что относительная погрешность измерения расстояния в воздухе при наличии ветра совпадающего по направлению с направлением распространения прямого или отраженного сигнала определяется по формуле:

$$\varepsilon_B \approx \left(\frac{V_B}{c} \right)^2, \quad (16)$$

где V_B – скорость ветра в трубе. Анализ показывает, что погрешность становится достаточно ощутимой при скорости ветра свыше 10 м/сек.

Влияние внешних акустических шумов. Очевидно, что посторонние звуки будут приводить к возникновению погрешностей. К таким звукам следует отнести шум работающих механизмов, звуки, возникающие при ударах по трубе или по рядом стоящим предметам, музыка или крик человека. Одиночные звуки вызывают сбой показаний прибора и носят случайный характер. Систематические акустические шумы, например создаваемые механизмом, работающим у открытого конца трубы, могут вызвать серьезные погрешности в показаниях и требуют специальных мер защиты. К таким мерам следует отнести включение в состав прибора анализатора шума или фильтра, который можно настраивать непосредственно перед началом измерений.

Влияние грязи и посторонних предметов в трубах. Посторонние предметы в трубах вызовут промежуточное отражение акустического сигнала и сбой показаний. Грязь, масло или ржавчина на стенках изменяют общее акустическое сопротивление трубы. Исследования показали, что при наличии распределенной грязи с амплитудой неровностей 0,2 мм и средним периодом 2 мм погрешность может достигать до 2,0 %.

Отметим, что в общем случае кроме климатических факторов дополнительные погрешности вызываются также нестабильностью источника питания и параметров электронных компонентов схемы. Однако, при частотно-импульсных методах измерений эти факторы могут влиять лишь бинарным образом и определяют только принципиальную работоспособность прибора с позиций достаточности. Например, изменение напряжения источника питания может привести к уменьшению амплитуды акустического импульса. Но скорость распространения акустического сигнала в воздухе не зависит от его амплитуды, поэтому влияние нестабильности источника питания на результат измерений будет незначительно. Конечно, нестабильность параметров электронной схемы будет вызывать изменение крутизны фронтов электрических сигналов, однако эти вопросы решены в теории и практике построения электронных схем время-импульсных измерений. Подводя итоги по анализу дополнительных по-

грешностей, можно составить таблицу влияния климатических и физических факторов на результат измерений в ожидаемых условиях эксплуатации (Табл. 1).

Таблица 1

№	Факторы	Максимальная относительная погрешность в ожидаемых условиях эксплуатации, (%)	Обозначение	Примечание
1	Температура	4,2	ε_T	240 – 320 град К
2	Влажность	2,0	$\varepsilon_{ВЛ}$	40 – 100 %
3	Давление	0,07	ε_D	700 – 800 тор.
4	Примесь CO_2	0,06	ε_{CO}	0,03 – 0,06 % объема
5	Ветер	0,4	ε_B	0 – 20 м/сек
6	Поглощение	6,5	ε_{Π}	0,4 – 1,0
7	Шумы	Сбой показаний		Случайная

Общая относительная дополнительная погрешность, вызванная изменением климатических факторов, может быть вычислена путем геометрического сложения составляющих по формуле:

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_{ВЛ}^2 + \varepsilon_D^2 + \varepsilon_{\text{CO}}^2 + \varepsilon_B^2} \quad (17)$$

Отметим, что фактор 6 таблицы 1 в скрытой форме включает в себя все климатические факторы 1 – 5. Максимальная дополнительная погрешность в ожидаемых условиях эксплуатации по данным таблицы 3.1 составит $\varepsilon_{\text{доп. макс}} = 4,68$ %. На длине трубы 12 м максимальная абсолютная погрешность равна 0,56 м, что неприемлемо для коммерческого прибора. Поэтому дополнительные погрешности требуют обязательного корректирования.

Список использованных источников

1. Скворцов Б.В., Жиганов И.Ю. Электронно-акустические приборы измерения длины труб // Тезисы доклада X научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик – 98), Гурзуф, 1998.
2. Кайно Г. Акустические волны М.: Мир, 1990.
3. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы и средства измерения расстояний в воздушной среде. - М.: Энергия, 1973.